

# Ellenáramú polimer membrán anyagú entalpiás és polisztirol anyagú normál hőcserélős hővisszanyerős szellőztető berendezés hatásfokának kísérleti vizsgálata

Dr. Kassai Miklós PhD<sup>1</sup>, Laith Al-Hyari<sup>2</sup>

## Abstract

The usage of energy recovery ventilation units has been extended in European countries. Air-to-air heat and energy recovery is effective procedure to reduce energy consumption of the ventilation air. However, the material of the core significantly influences the performance of the exchangers which aspect is becoming an extremely important role to meet the energy requirements of nearly zero-energy buildings. In this study the heating and cooling energy performances of two counter-flow heat/enthalpy energy exchangers are experimentally tested under different operating conditions and the values of the sensible, latent and total effectiveness are presented.

## 1. Bevezetés

Az épületek energiateljesítményéről szóló irányelv új átdolgozásának (EPBD 2018/844) egyik célkitűzése az, hogy előmozdítsa az európai (EU) országokban az épületek energiateljesítményének javítását és költséghatékonyságát, figyelembe véve az adott régió éghajlati adottságait, a kiszolgált tér belső levegő minőségére és hőkomfortjára vonatkozó követelményeit [1]. Az éghajlati adottságok jelentősen befolyásolják az épület energiafogyasztását [2]. Az energiafelhasználást több kutató vizsgálta különböző éghajlati viszonyok mellett [3, 4]. Különböző időjárási viszonyokat vizsgáltak, mint például a száraz hőmérséklet, nedves hőmérséklet, szélesebség, globális napsugárzás, és leírták, hogy ezek a paraméterek hogyan befolyásolták a szükséges fűtési és hűtési energiateljesítményt [5]. Néhány tanulmány alapján az említett környezeti klimatikus paraméterek közül a külső levegő hőmérsékletének változása befolyásolja leginkább az energiaigényt. Következésképpen a hőfokhid módszer az egyik leghasznosabb számítási eljárás az energiaigény becslésére, amely figyelembe veszi a kiszolgált tér belső levegő hőmérséklete és a külső levegő hőmérséklete közötti különbséget [6].

Az irányelvben szereplő közel nulla energiaigényű épület („Net Zero Energy Buildings”) meghatározás szerint ezeknek az épületeknek nagyon magas energiahatékonysággal kell rendelkezniük [9]. A magas fokú energetikai követelmények teljesítése érdekében fejleszteni kell az épületek külső térfelületének hőszigetelését. A másik megoldás a filtrációs hővesztés csökkentése mesterséges hővisszanyerős szellőztető berendezések használatával a természetes szellőztetés helyett [11].

Az épületgépészeti rendszerek teljes energiafogyasztásának közel 20–40%-át a legtöbb kereskedelmi épület esetében szellőztetésre használják. Olyan épületekben, ahol 100% kültéri friss levegőre van szükség a megfelelő belső levegő minőségi előírások teljesítéséhez (pl. kórházak), ez a százalékarány még magasabb lehet (pl. 50–60%) [12–13]. A hővisszanyerő elem nélkül üzemelő szellőztető berendezés növeli az épületek energiafogyasztását, mivel a kültéri levegőt hűteni vagy melegíteni kell ahhoz, hogy közel álljon a kiszolgált térben tartani kívánt komfortos belső levegő állapothoz.

A mesterséges szellőztetést már sok éve használják korlátozott számú kereskedelmi épületben, és most egyre gyakoribbá válik a lakóházakban; különösen azoknál, amelyeknek meg kell felelniük a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelményeknek az EU-országokban [14].

Az EPBD-irányelvben a közel nulla energiaigényű épületek (NZEB) definíciója szerint ezeknek az épületeknek nagyon szigorú energiahatékonysági követelményeknek kell megfelelniük. Mivel a hőszigetelt épületek nagymértékben légtömören vannak kialakítva, a hővisszanyerős szellőztető egységek használata elengedhetetlen a kellemes belső levegőminőség biztosításához, valamint a fokozott nedvességtartalék eltávolításához az ingatlan penészesedésének elkerülése céljából, megfelelő szellőző levegő mennyiség biztosítása mellett [15]. Ezért a központi hővisszanyerős szellőztető rendszerek használata egyedülállóan hozzájárul az NZEB-követelmények teljesítéséhez. Ezek az egységek tartalmaznak egy levegő-levegő hőcserélőt, amely lehetővé teszi a hő (és nedvesség) átadását a befűtött friss levegő és az elszívott elhasznált levegőáramok között [11].

A szellőztető rendszerek energiafelhasználásának becslése szintén nagyon összetett tervezési probléma, ami sok információt igényel, szükséges például a külső környezeti, valamint a kiszolgált tér belső légállapotának (hőmérsékletének, relatív páratartalmának, entalpiájának), a szellőző levegő tömegáramának, a hővisszanyerő hatásfokának, a levegő kiegészítő fűtéséhez és hűtéséhez használt technológiának az ismerete. Az üzemeltetés energiafogyasztásának kiértékeléséhez szükséges számítások e paraméterek függvényeit tartalmazzák az idő szerint integrálva, és meglehetősen összetett eljárások. Még bonyolultabb a helyzet, ha a hővisszanyerés mellett nedvesség visszanyerés is történik a légcseré során [16–17].

Kutatási munkánk során egy Zehnder ComfoAir Q350 szellőztető berendezésbe épített polisztirol alapú ellenáramú, csak hőátvitelre alkalmas hővisszanyerő (HRV) és polimer membrán (polietilén-poliéter-kopolimer) alapú ellenáramú hő- és nedvességátvitelre is alkalmas entalpiás hővisszanyerő (ERV) szenzibilis, látens és totális hatásfokát vizsgáltuk kísérleti módszerekkel.

<sup>1</sup> egyetemi docens,

<sup>2</sup> PhD hallgató

BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék



A cél az volt, hogy a gyártó által megadott 1-1 hatásfok adathoz képest sokkal több adatot állítsunk elő, kiterjesztett skálájú környezeti külső léghőmérséklet- és páratartalom-tartományokban (az EN 13141-7:2010 szabvány teljesítmény-tesztelési feltételei alapján [18]).

A kísérleti vizsgálatok elvégzéséhez a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Macskásy Komfort és Klimatechnikai Laboratóriumában az általam kifejlesztett Hővisszanyerős Mérőállást (HVM) használtuk fel, amely lehetővé teszi a különböző típusú, valós méretű hővisszanyerők hatásfokának kísérleti vizsgálatát különböző légállapotok és üzemviteli paraméterek mellett.

## 2. A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott módszer

Az EN 13141-7 európai szabvány részletes tájékoztatást nyújt az alkalmazandó laboratóriumi vizsgálati módszerről és egy-egy módon meghatározza a vizsgálati követelményeket lakóházakba tervezett mechanikus szellőztető egységek termikus, aerodinamikai, akusztikai és villamos teljesítőképességének vizsgálatára vonatkozóan [18].

A szabvány alapján a fűtési teljesítőképesség-vizsgálatot  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  külső levegő (friss levegő) és  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os elszívott levegő száraz hőmérséklet mellett kell elvégezni; a hűtési teljesítőképesség-vizsgálat esetében a külső levegő oldali hőmérsékletet  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra és  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra kell beállítani  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os elszívott száraz levegő hőmérséklet mellett [18].

A kifejlesztett HVM mérőállás ennél sokkal szélesebb légállapot tartományban teszi lehetővé a kísérletek elvégzését a környezeti, a külső levegő (mint frisslevegő oldali) hőmérséklet és a páratartalom értékek előállítására szempontjából.

### 2.1. A kísérleti mérőállás és a kísérleti eljárás bemutatása

Egy Zehnder ComfoAir Q350 szellőztető berendezésbe épített polisztirol alapú ellenáramú hőcserélő (HRV) és polimer membrán (polietilén-poliéter-kopolimer) alapú ellenáramú energiacserélő (ERV) hatásfokát vizsgáltuk kísérleti módszerekkel (1. ábra) állandósult körülmények mellett. További

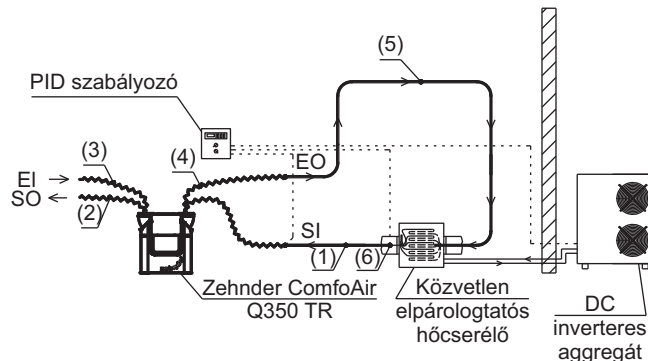


1. ábra. A HVM kísérleti mérőállás a vizsgált berendezéssel

cél volt, hogy a méréseket a lehető legszélesebb üzemviteli tartományokban lehessen elvégezni.

#### 2.1.1. A frisslevegő- (mint külső környezeti levegő) oldali légállapot hőmérsékletének beállítása

A frisslevegő hőmérséklet célértékét ( $t_{si}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) az SCMI-01 PID-szabályozó egységgel állítottuk be (2. ábra).



2. ábra. A HVM kísérleti mérőállás kapcsolási rajza

A 2. ábrán az (1), (2), (3), (4) a légszűrőben áramló levegő hőmérsékletének és páratartalmának a mérési pontjait, az (5) a friss levegő ág nedvesítésének helyét jelöli, a (6) a közvetlen elpárolgató hőcserélő felületi hőmérsékletének mérési pontja a PID szabályozóba bekötve, az SI a frisslevegő ágat, az EO a kidobott levegő ágat, az SO a befújt levegő ágat, az EI pedig az elszívott levegő ágat jelöli.

Figyelembe véve a beállított, tartani kívánt frisslevegő hőmérséklet, a mért tényleges frisslevegő hőmérsékletének, illetve a közvetlen elpárolgató felületi hőmérséklet értékei alapján a PID szabályozó változtatja a DC inverteres aggregát szükséges teljesítményét, a kompresszorának folyamatos fordulatszám-szabályozásával.

#### 2.1.2. A frisslevegő- (mint külső környezeti levegő) oldali légállapot páratartalmának beállítása

A frisslevegő relatív páratartalmát ( $RH_{si}\text{ }[\%]$ ) a 2. ábrán az (5) pontba helyezett vízporlasztókkal állítottuk be. A porlasztók anyaga kerámia, vízellátásukat csapvízhálózatra csatlakoztatva oldottuk meg. A vízközeg szükséges tömegáramát Herz típusú radiátorszelepekkel szabályoztuk.

#### 2.1.3. Az elszívott oldali légállapot hőmérsékletének és páratartalmának beállítása

Az elszívott levegő hőmérséklet ( $t_{ei}\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) biztosításához egy HOME FK 30 típusú elektromos fűtőtestet, az állandó relatív páratartalom ( $RH_{ei}\text{ }[\%]$ ) biztosításához pedig ultrahangos párasító egységeket helyeztünk el az elszívott levegő oldalhoz tartozó légszűrő közelében (lásd a következő oldalon bemutatott 3. ábrát).

#### 2.1.4. A kísérleti adatok rögzítési és kiértékelési módszere

A levegő hőmérsékletét és páratartalmát egy Testo 480 multifunkciós klimatechnikai mérőműszer rögzítette Testo típusú érzékelőkkel, amelyeket a 2. ábrán látható (1), (2) és (3) mérési pontokban a levegőcsatornák közepében helyeztünk el.



3. ábra. Az elszívott levegő légállapotának biztosítása

A levegő térfogatáram beállításához egy Testo Smartprobes 405i típusú hődrótos légsebesség érzékelőt használtunk.

A hatásfok értékeket a mért légállapot értékek alapján az (1) egyenlettel határoztuk meg [18-19]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{si} \cdot (X_{si} - X_{so})}{\text{Min}[\dot{m}_{si}, \dot{m}_{ei}] \cdot (X_{si} - X_{ei})}, \quad (1)$$

ahol az (1) egyenletben az „X” helyére a „t” (hőmérséklet [°C]) kerül a szenzibilis hatásfok esetében, az „x” (abszolút nedvességtartalom [kg/kg]) a látens hatásfok esetében és a „h” (entalpia [kJ/kg]) a totális hatásfok esetében. Ilyen módon a hatásfok adatok kiértékelése a hővisszanyerő belépő és kilépő oldalain, állandósult körülmények mellett mért levegő hőmérséklet és páratartalom értékeinek a mérésén alapul.

A vizsgálati körülményeket jelentősen kiterjesztettük a környezeti levegő hőmérséklet, a páratartalom és az entalpia vonatkozásában, összehasonlítva a kutatási munkában használt szabványban (EN 13141-7) előírt követelményekkel. Az ASHRAE Standard 84-1991 szabvány annyiban még több instrukciót ad az EN 13141-7:2010 szabványhoz képest, hogy az entalpia különlegekből adódó totális hatásfok meghatározását is hangsúlyozza (a szenzibilis és látens hatásfokok mellett) az (1) egyenlet alapján látható módon, amelynek az energetikai méretezés szempontjából van nagy jelentősége.

## 2.2. A kísérleti vizsgálat folyamatának bemutatása

A kísérletek megvalósításához szükséges mérési tervet a következő szempontok alapján állítottuk össze:

- A vizsgálatokat a kiértékelés során kapott eredmények gyakorlati jelentősége szempontjából alapvetően két külső környezeti levegő állapotra osztottuk: fűtési időszakban végzett vizsgálatok téli külső légállapotok mellett és hűtési időszakban történő vizsgálatok nyári külső légállapotok mellett.
- A kísérletek során az elszívott levegő állapotát az 1. táblázatban összefoglaltak szerint az EN 13141-7 európai szabvány utasításai alapján állítottuk be [18].
- Az 1. táblázat alapján az elszívott levegő relatív páratartalmát 38%-ra állítottuk be a fűtési időszak során végzett vizsgálatokhoz és 47%-ra a hűtési időszak vizsgálataihoz.

1. táblázat. A beállított levegőhőmérséklet értékei a vizsgálatokhoz fűtési és hűtési időszakban [18]

Az elszívott levegő száraz (nedves) hőmérséklete	A kültéri levegő száraz (nedves) hőmérséklete
<b>Fűtési időszak esetén</b>	
20 (12) °C	7 (6) °C
20 (12) °C	2 (-1) °C
20 (12) °C	-7 (-8) °C
<b>Hűtési időszak esetén</b>	
27 (19) °C (kötelező)	35 (24) °C (kötelező)
27 (19) °C (opcionális)	27 (19) °C (opcionális)

- További cél volt, hogy a vizsgálatokat sokkal szélesebb tartományú kültéri levegő állapotok mellett végezzük el, mint amit az EN 13141-7 szabvány előír, így kiterjesztve a gyártó által megadott hatásfok értékeket is. Ily módon a külső levegő hőmérsékletét 5 °C-os levegőhőmérséklet lépésekben változtattuk -15 és 10 °C között, és a külső levegő relatív páratartalmát 10%-os lépésekben 70 és 100% között a fűtési időszak során végzett vizsgálatokhoz. A hűtési időszakra vonatkozó teljesítőképesség vizsgálatok során a kültéri levegő hőmérsékletét 27 °C és 40 °C közötti értéktartományban állítottuk be 5 °C-os léptetéssel, illetve relatív páratartalmát 40% és 90% közötti értéktartományban, 10%-os léptetéssel.
- Az összes vizsgálatot négy különböző levegő térfogatáram (100, 200, 300 és 350 m<sup>3</sup>/h) mellett végeztük el.
- A vizsgálatok során a befúvó és az elszívó ventilátorok közötti nyomáskülönbség nulla volt, kiegyenlített szellőztetési üzem mellett végeztük el a méréseket.
- Az állandósult állapotok mellett történő vizsgálati változók beállításának sorrendje az adatrögzítés előtt a következő volt: a levegő térfogatáramának, majd a külső friss levegő hőmérsékletének és végül a relatív páratartalmának beállítása.
- Minden bemeneti paraméter esetében a méréssorozatot addig végeztük, amíg a rendszer el nem érte az állandósult állapotot, ekkor rögzítettük a kiértékelés szempontjából már releváns adatokat.

## 3. Eredmények és kiértékelés

A következőkben egy polisztirol anyagú, csak hőátvitelre alkalmas ellenáramú hővisszanyerő (HRV) és polimer membrán (polietilén-poliéter-kopolimer) anyagú hő- és nedvességátvitelre is alkalmas entalpiás ellenáramú hővisszanyerő (ERV) szenzibilis, látens és totális hatásfok értékeit mutatjuk be, amelyeket a téli és nyári időszakban végzett kísérleti vizsgálatok mérési adataiból számítottunk ki az (1) egyenlet segítségével. Ezen túlmenően a HRV és ERV hővisszanyerők teljesítőképességét szenzibilis hatásfok szempontjából is összehasonlítottuk, azonos mérési feltételek és üzemviteli körülmények mellett.

### 3.1. A hő- és nedvességátvitelre is alkalmas ellenáramú entalpiás ERV hővisszanyerő hatásfoka

#### 3.1.1. Az ERV szenzibilis hatásfokának értékei a külső levegő hőmérsékletének függvényében

A 4. ábra mutatja a szenzibilis hatásfokot a külső levegő hőmérséklet tekintetében különböző térfogatáramoknál téli

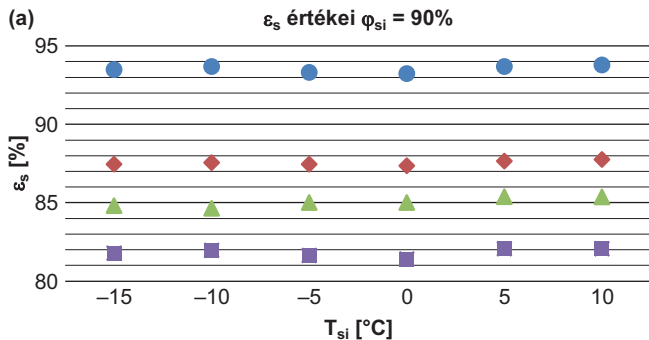


( $\varphi_{si} = 90\%$ ) és nyári időszakban ( $\varphi_{si} = 40\%$ ).

Észrevehető, hogy a száraz hőmérséklet emelkedésével a hatásfok is kissé emelkedik. A különböző térfogatáramlási trendek azt mutatják, hogy a magasabb hatásfok érték a kisebb térfogatáram melletti üzemeltetés esetén valósul meg.

### 3.1.2. Az ERV látens hatásfokának értékei a külső levegő hőmérsékletének függvényében

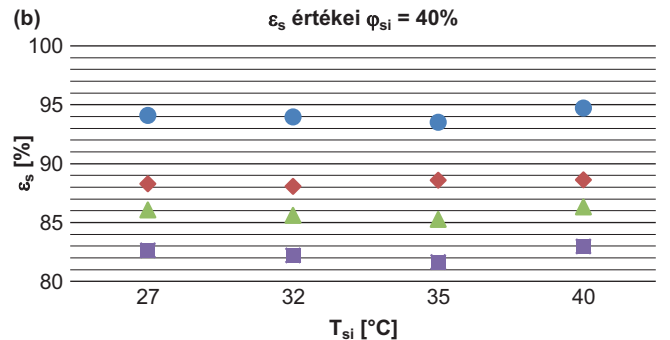
Az 5. ábra mutatja a látens hatásfok értékeit a külső levegő hőmérsékletének függvényében, különböző levegő térfogatáramok mellett üzemeltetés esetén, téli időszakban ( $\varphi_{si} = 90\%$ ) és nyári időszakban ( $\varphi_{si} = 40\%$ ).



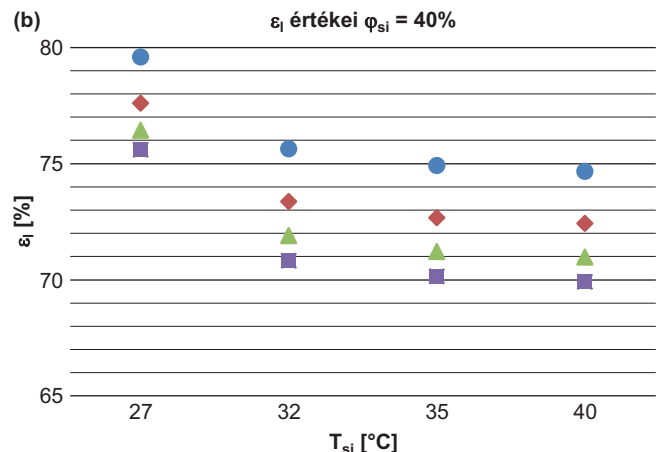
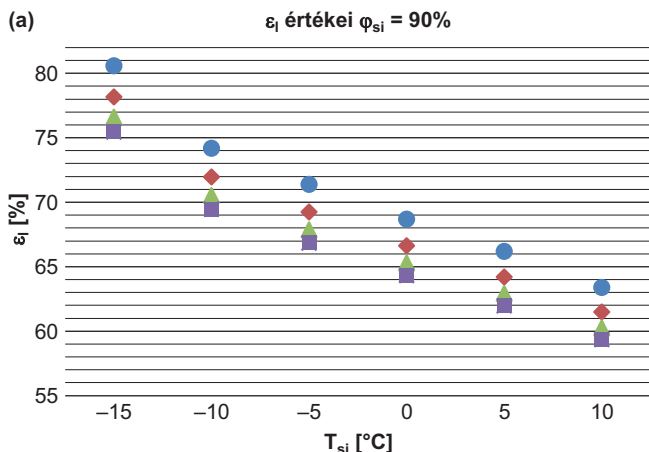
Az 5. ábrán egyértelműen látható, hogy látens hatásfok értékei csökkennek a külső környezeti levegő hőmérsékletének emelkedésével, valamint az adott hőmérséklet szinten a levegő térfogatáram növelésével is csökkenő tendenciát mutat. Az eredmények alapján az ERV átlagos látens hatásfokának értéke téli és nyári időszak esetén is 69% volt.

### 3.1.3. Az ERV totális hatásfokának értékei a külső levegő hőmérsékletének függvényében

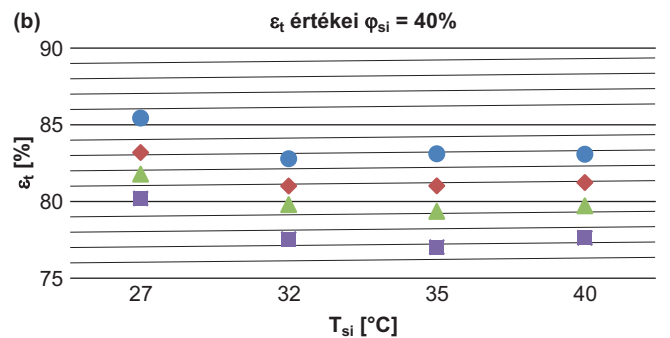
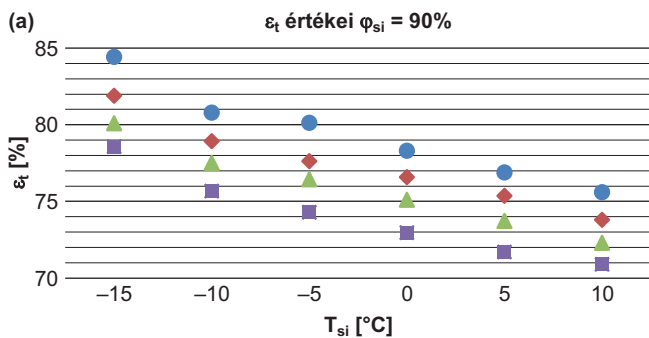
A 6. ábra mutatja a totális hatásfok értékeit a külső levegő hőmérsékletének függvényében, különböző levegő térfogatáramok mellett végzett üzemeltetés esetén, téli időszakban



4. ábra. A szenzibilis hatásfok (%) a külső levegő hőmérséklet (°C) függvényében különböző térfogatáramoknál (a) téli időszak esetén és (b) nyári időszak esetén



5. ábra. A látens hatásfok (%) a külső levegő hőmérséklet (°C) függvényében különböző levegő térfogatáramoknál (a) téli időszak esetén és (b) nyári időszak esetén



6. ábra. A totális hatásfok (%) a külső levegő hőmérséklet (°C) függvényében különböző levegő térfogatáramoknál (a) téli időszak esetén és (b) nyári időszak esetén

( $\varphi_{si} = 90\%$ ) és nyári időszakban ( $\varphi_{si} = 40\%$ ). A 6. ábrán egyértelműen látható, hogy a külső levegő hőmérséklet emelkedésével csökkent a hatásfok, és a térfogatáram növekedése is csökkenő hatásfokot idéz elő.

Az eredmények alapján az ERV átlagos totális hatásfokának értéke téli időszak esetén 77%, míg nyári időszak esetén 78% volt.

### 3.1.4. Az ERV látens hatásfokának értékei a külső levegő relatív páratartalma függvényében

A 7. ábra mutatja a látens hatásfok és a külső levegő relatív páratartalom összefüggését  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  térfogatáram mellett a téli és a nyári időszak esetén. Megállapítható, hogy a hatásfok enyhe csökkenése tapasztalható, ha a relatív páratartalom télen nő, míg nyáron a hatékonyság csökkenése nyilvánvalóbb. Másrészt, a hatásfoktrend a különböző hőmérsékleteket tekintve azt mutatja, hogy a hatásfok csökken, ha a külső levegő hőmérséklete csökken.

### 3.1.5. Az ERV látens hatásfokának értékei a külső levegő abszolút nedvességtartalma függvényében

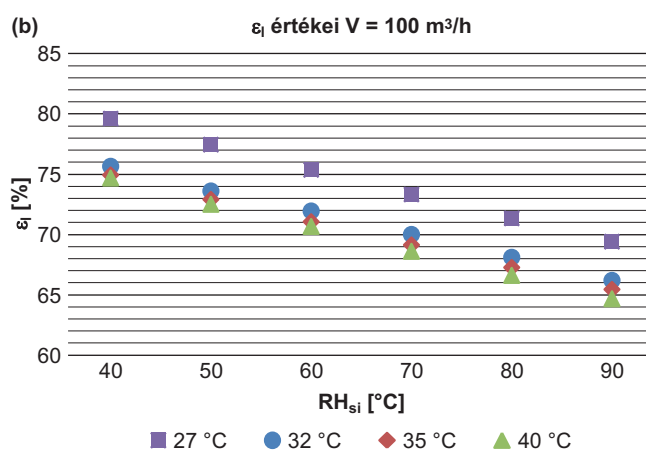
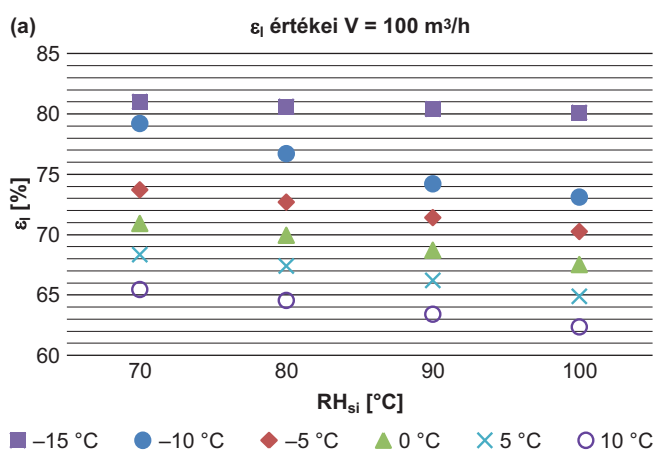
A 8. ábra mutatja a látens hatásfok értékeit a külső levegő abszolút páratartalmának függvényében különböző levegő térfogatáramok mellett üzemeltetés esetén, téli esetben ( $\varphi_{si} = 90\%$ ) és nyári esetben ( $\varphi_{si} = 40\%$ ). Az eredményekből megállapítható, hogy minél szárazabb a külső levegő télen, vagyis minél kisebb a külső levegő abszolút nedvességtartalma télen, az ERV annál hatékonyabban képes párasítani a berendezésbe érkező hideg, száraz külső friss levegőt. Nyáron pedig a

külső levegő abszolút nedvességtartalmának növekedésével a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) mértéke csökken a helyiségekből elszívott, elhasznált levegő oldal és a befűjt, friss levegő oldal között, aminek következtében a kiszolgált térben nagyobb mértékű páramentesítés érhető el.

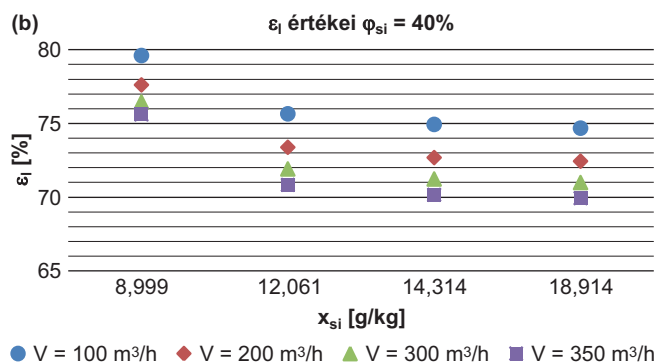
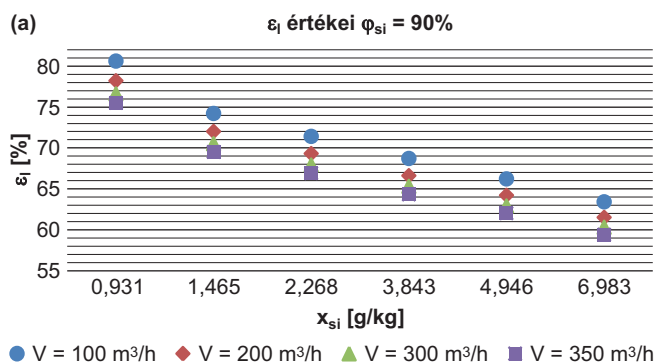
A 8. ábrából látható, hogy télen a párasítás mértéke akkor a legnagyobb, amikor a legszárazabb a külső levegő. A kísérletek során kapott eredmények alapján a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) maximális értéke  $80,6\%$  volt,  $0,931 \text{ [g/kg]}$  külső levegő abszolút nedvességtartalom esetén, télen. Nyáron pedig minél nedvesebb a külső levegő, vagyis a külső levegő abszolút nedvességtartalmának növekedésével, a szellőztetett térben a páramentesítés mértékének növekedése jellemző, hiszen az említett külső levegő állapotváltozásának folyamata során a kiszolgált térbe befűjt friss levegő nedvességtartalma egyre kisebb lesz (a látens hatásfok csökkenése miatt), az állandó elszívott, elhasznált levegő állapot feltételezése mellett. Így a szellőző levegő több nedvességterhelést lesz képes felvenni és elszállítani a kiszolgált térből nyáron.

A kísérletek során kapott eredmények alapján a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) mértékének minimuma  $69,6\%$  volt,  $18,914 \text{ [g/kg]}$  nyári külső levegő abszolút nedvességtartalom esetén.

Az eredményekből tehát levonható az a következtetés, hogy a szellőztető berendezés ERV-val történő üzemeltetése kedvezően hat a kiszolgált tér belső levegő minősége szempontjából is.



7. ábra. A látens hatásfok (%) a külső levegő relatív páratartalma (%) függvényében,  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  levegő térfogatáram mellett, (a) téli időszak esetén és (b) nyári időszak esetén



8. ábra. A látens hatásfok (%) a külső levegő abszolút páratartalma (%) függvényében, különböző levegő térfogatáramoknál (a) téli időszak esetén és (b) nyári időszak esetén

### 3.1.6. A ERV totális hatásfoka a külső levegő relatív páratartalmának függvényében

A 9. ábra mutatja a totális hatásfok és a külső levegő relatív páratartalma közötti összefüggést, 100 m<sup>3</sup>/h levegő térfogatáram mellett üzemeltetés esetén a téli és a nyári időszakban. Az ábrán összességében az látható, hogy a hatásfok értéke csökken a külső levegő relatív páratartalmának növekedésével. Másrészt, a totális hatásfok értékei csökkennek az adott külső levegő relatív páratartalom értékhez tartozó külső levegő hőmérséklet értékek növekedésével.

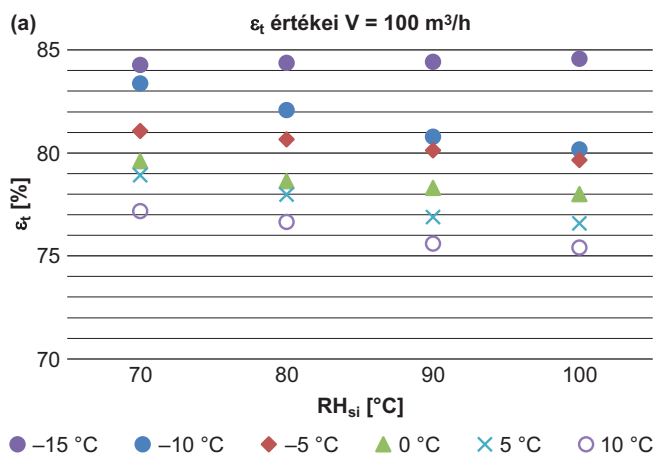
### 3.1.7. Az ERV hatásfokának értékei a külső levegő hőmérsékletének függvényében az EN szabvány előírása alapján

A fűtési teljesítőképesség kísérleti vizsgálatait az EN szabványokban meghatározott külső levegő hőmérséklet értékek mellett külön is elvégeztük (a nyári időszakra vonatkozó eredmények a 4-9. ábrákon láthatók). A 10. ábra mutatja a szenzibilis, látens és totális hatásfokok értékeit a külső levegő hőmérséklet (száraz hőmérséklet:  $t_{si}$ ; nedves hőmérséklet:  $t_{ni}$ ) értékek függvényében az EN szabványban megadottak szerint.

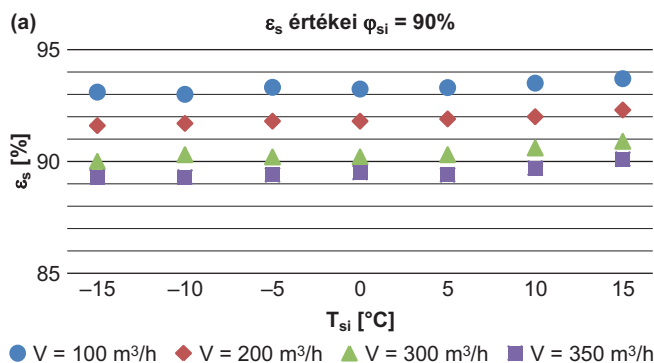
## 3.2. A csak hőátvitelre alkalmas ellenáramú HRV hővisszanyerő hatásfoka

### 3.2.1. A HRV szenzibilis hatásfoka a külső levegő hőmérsékletének függvényében

A 11. ábra mutatja a szenzibilis hatásfokot a külső levegő hőmérsékletének függvényében különböző levegő térfogatáramok mellett.



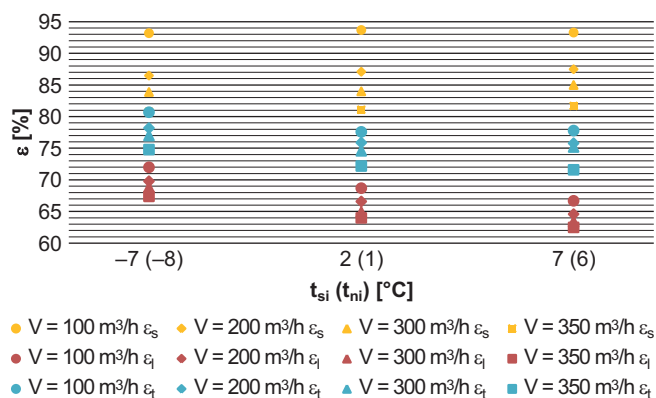
9. ábra. A totális hatásfok (%) a külső levegő relatív páratartalma (%) függvényében, 100 m<sup>3</sup>/h levegő térfogatáram mellett, (a) téli időszak és (b) nyári időszak esetén



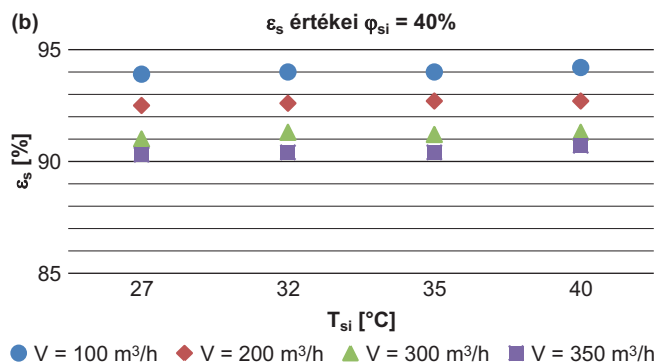
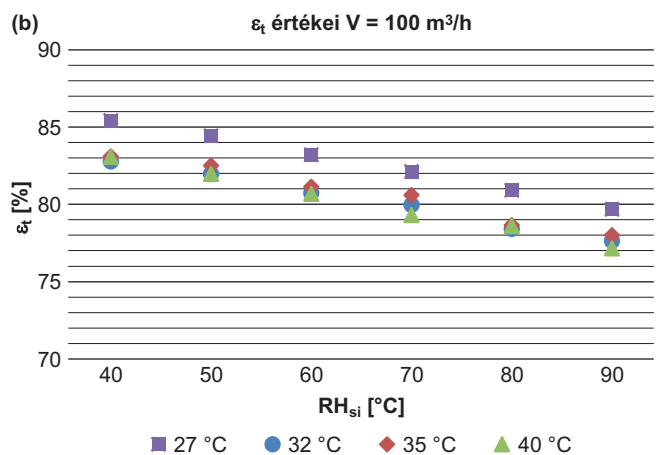
áramok mellett üzemeltetés esetén, téli esetben ( $\varphi_{si} = 90\%$ ) és nyári esetben ( $\varphi_{si} = 40\%$ ). Az ábrán látható, hogy a külső levegő hőmérsékletének emelkedésével a hatásfok is kismértékben emelkedő tendenciát mutat. A hatásfok maximális értéke a legkisebb térfogatáram mellett valósult meg.

### 3.2.2. Szenzibilis hatásfok a külső levegő hőmérsékletének függvényében az EN szabvány előírása alapján

A 12. ábra mutatja az összefüggést a szenzibilis hatásfok és a külső levegő hőmérséklete között az EN szabványokban megadottak szerint különböző levegő térfogatáramok mellett.

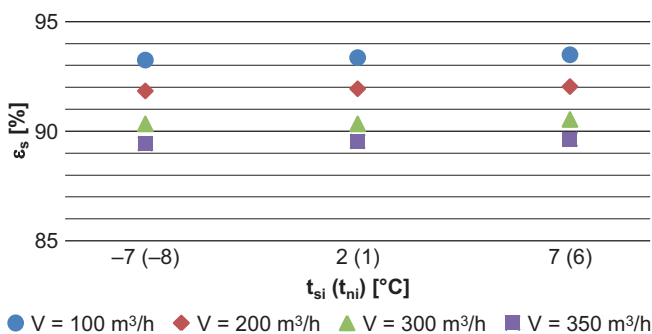


10. ábra. A hatásfok (%) értékei a száraz (nedves) külső léghőmérséklet (°C) függvényében különböző levegő térfogatáramok mellett üzemeltetés esetén



11. ábra. A szenzibilis hatásfok (%) a külső léghőmérséklet (°C) függvényében különböző levegő térfogatáramok mellett, (a) téli időszak és (b) nyári időszak esetén

Az ábrán látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével a hatásfok is kissé emelkedik.

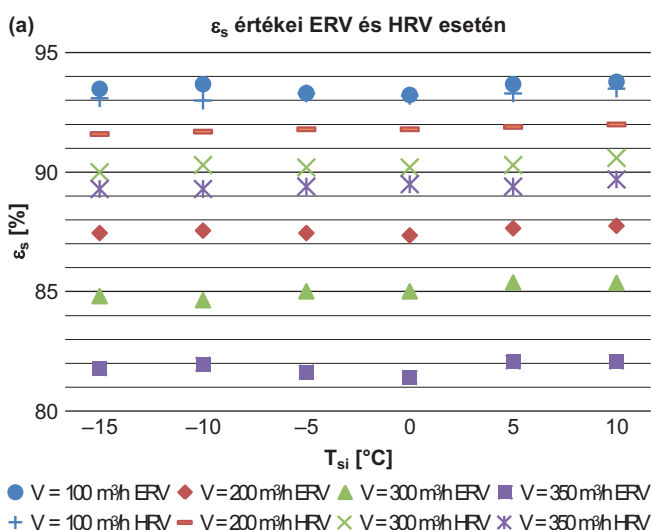


12. ábra A szenzibilis hatásfok (%) értékei a külső léghőmérséklet (°C) függvényében, különböző levegő térfogatáramok mellett

### 3.2.3. A ERV és HRV hővisszanyerők szenzibilis hatásfok értékeinek összehasonlítása

A 13. ábra mutatja az összehasonlítást az ERV és a HRV hővisszanyerők szenzibilis hatásfok értékei között, különböző külső levegő hőmérsékletek és levegő térfogatáramok melletti üzemeltetés esetén, téli és nyári időszakban.

Az eredmények azt mutatják, hogy a HRV összességében magasabb szenzibilis hatásfok értékekkel rendelkezik, mint az ERV, különösen a nagyobb levegő térfogatáram melletti üzemvitel esetén. A HRV átlagos szenzibilis hatásfokának értéke téli időszak esetén 91% és nyári időszakban 92%, míg az ERV átlagos szenzibilis hatásfokának értéke télen és 87,8% volt nyáron. Itt meg kell említeni, hogy az ERV és a HRV szenzibilis hatásfok értékeinek összehasonlítása alapján nem lehet éves energiafogyasztásra vonatkozó következtetéseket levonni, hiszen az entalpiás ERV hővisszanyerő belsejében a hőátvitel mellett nedvességátvitel is történik a szellőztető berendezésbe érkező külső frisslevegő és a kiszolgált térből elszívott, elhasznált levegőáramok között, így nem lehet figyelmen kívül hagyni az ERV látens, illetve totális hatásfokát az épületenergetikai méretezések, energetikai tanúsítások készítése során.



A szenzibilis hatásfok maximális értékeit egyébként nyári időszakban (40 °C külső léghőmérséklet esetén) 100 m³/h levegő térfogatáram melletti üzemeltetés esetén mértük, e hatásfokok értéke HRV esetében 94,2%, míg az ERV esetében csupán kisebb eltéréssel 94,1% volt.

### 3.3. A mérési bizonytalanság számítása

A mérések bizonytalanságát azért fontos számítással meghatározni, mert meg kell vizsgálni a kísérleti mérések százalékos hibáját. A kísérlet során a mérési bizonytalanságokat két típusra lehet osztani [20]:

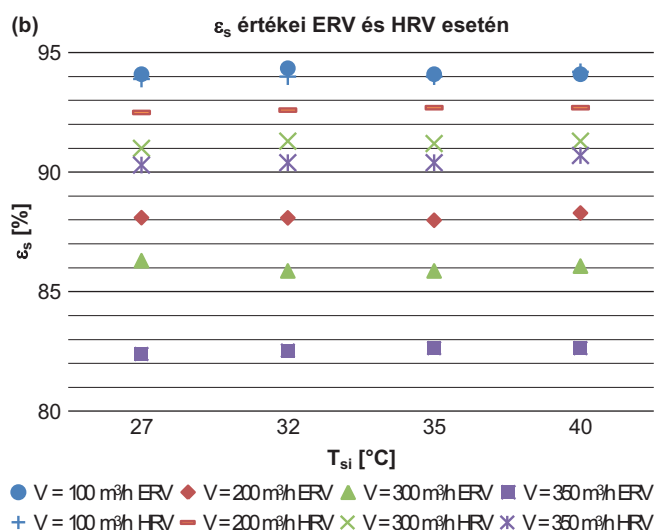
1. Véletlenszerű bizonytalanság: a műszer pontossága,
2. Szisztematikus bizonytalanság: mérési kalibráció.

Az előző, 4 – 13. ábrákból látható, hogy a hatásfok értékek ingadozást mutattak. Ezeknek az ingadozásoknak az oka például, hogy a frisslevegő oldalon a levegőbe vízcseppeket permetező vízporlasztó fejek nem tudják mindig 100%-os hatékonysággal a vizet vízgőzzé porlasztani. Hasonló bizonytalanságot tapasztaltunk az elszívott levegő oldalon alkalmazott ultrahangos párasítókiből származó vízgőznek a légcsatornába történő belépése során, ami nedvességingadozás mellett kismértékű hőmérséklet fluktuációt is előidézhethet. Ez bizonytalanságot okoz a hatásfok értékek kiszámítása, kiértékelése során.

A véletlenszerű bizonytalanságot a kísérleti eredmények bizonytalanságának becslésére használt Kline és Mc Clintock módszerrel [20] számítottuk ki a (2) egyenlet alapján:

$$\omega_R = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \omega_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \omega_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \omega_{x_n}\right)^2} \quad (2)$$

A szisztematikus bizonytalanságok értékeit megadták a mérőeszközök gyártói (lásd a következő oldalon található 2. táblázatot).



13. ábra Az ERV és HRV szenzibilis hatásfok (%) értékei a külső léghőmérséklet (°C) függvényében, különböző levegő térfogatáramok mellett, (a) téli időszak és (b) nyári időszak esetén

2. táblázat. A Testo multifunkciós műszer kalibrálási eredménye

Névleges érték	Névleges érték	Mért érték	Eltérés	Bizonytalanság
40% RH	39,9% RH	40,5% RH	0,6% RH	0,5% RH
0 °C	0,09 °C	0,3 °C	0,21 °C	0,08 °C
1 m/s	0,98 m/s	1,00 m/s	0,02 m/s	0,05 m/s

Vegyünk egy, az alábbi paraméterekkel mért adatmintát a hatások bizonytalanság kiszámításának bemutatásához:

A megfigyelt és mért adatok:

- 1 – Térfogatáram = 300 m<sup>3</sup>/h
- 2 – A külső frisslevegő hőmérséklete = -7 °C
- 3 – A külső frisslevegő relatív páratartalma = 75%
- 4 – Az elszívott elhasznált levegő hőmérséklete = 20 °C
- 5 – Az elszívott elhasznált levegő relatív páratartalma = 38%

A szenzibilis hatások bizonytalanságát a (3) – (6) egyenletekkel számítottuk ki az alábbiak szerint:

$$\omega_{\varepsilon_s} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial m_{si}} \cdot \omega_{m_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{si}} \cdot \omega_{T_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{so}} \cdot \omega_{T_{so}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{ei}} \cdot \omega_{T_{ei}}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{si}} = \frac{m_{si} \cdot (m_{si} \cdot T_{si} - m_{si} \cdot T_{ei}) - (m_{si} \cdot T_{si} - m_{si} \cdot T_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (T_{si} - T_{ei})]^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{so}} = \frac{-m_{si}}{m_{si} \cdot (T_{si} - T_{ei})}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T_{ei}} = \frac{(m_{si} \cdot T_{si} - m_{si} \cdot T_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (T_{si} - T_{ei})]^2}, \quad (6)$$

$$\omega_{\varepsilon_s} = \pm 2,92\%.$$

A látens hatások bizonytalanságát a (7) – (10) egyenletekkel számítottuk ki az alábbiak szerint:

$$\omega_{\varepsilon_L} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial m_{si}} \cdot \omega_{m_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{si}} \cdot \omega_{x_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{so}} \cdot \omega_{x_{so}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{ei}} \cdot \omega_{x_{ei}}\right)^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{si}} = \frac{m_{si} \cdot (m_{si} \cdot x_{si} - m_{si} \cdot x_{ei}) - (m_{si} \cdot x_{si} - m_{si} \cdot x_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (x_{si} - x_{ei})]^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{so}} = \frac{-m_{si}}{m_{si} \cdot (x_{si} - x_{ei})}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial x_{ei}} = \frac{(m_{si} \cdot x_{si} - m_{si} \cdot x_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (x_{si} - x_{ei})]^2}, \quad (10)$$

$$\omega_{\varepsilon_L} = \pm 5,04\%.$$

A teljes hatások bizonytalanságát a (11) – (14) egyenletekkel számítottuk ki az alábbiak szerint:

$$\omega_{\varepsilon_T} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial m_{si}} \cdot \omega_{m_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{si}} \cdot \omega_{h_{si}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{so}} \cdot \omega_{h_{so}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{ei}} \cdot \omega_{h_{ei}}\right)^2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{si}} = \frac{m_{si} \cdot (m_{si} \cdot h_{si} - m_{si} \cdot h_{ei}) - (m_{si} \cdot h_{si} - m_{si} \cdot h_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (h_{si} - h_{ei})]^2}, \quad (12)$$

A következő oldalon lévő 14. ábra mutatja az ERV és a HRV szenzibilis, látens és totális hatások értékénél a bizonytalanságot a külső levegő hőmérsékletének függvényében 300 m<sup>3</sup>/h levegő térfogatáram mellett, az EN szabvány szerint elvégzett fűtési teljesítőképesség vizsgálat esetén.

#### 4. Következtetések

Kutatási munkánk célja az volt, hogy megvizsgáljuk a szenzibilis, látens és totális hatásfokot egy polisztirol anyagú, csak hőátvitelre alkalmas ellenáramú hővisszanyerő (HRV) és egy polimermembrán anyagú (polietilén-poliéter-kopolimer) hő- és nedveségátvitelére is alkalmas ellenáramú entalpiás hővisszanyerő (ERV) esetében különféle üzemviteli paraméterek és különböző külső környezeti klimatikus légállapotok mellett.

Az eredmények azt mutatják, hogy a HRV összességében magasabb szenzibilis hatásfok értékekkel rendelkezik, mint az ERV, különösen a nagyobb levegő térfogatáram melletti üzemvitel esetében. A HRV átlagos szenzibilis hatásfokának értéke téli időszak esetén 91% és nyári időszakban 92%, míg az ERV átlagos szenzibilis hatásfokának értéke 87,2% volt télen és 87,8% volt nyáron.

Itt meg kell említeni, hogy az ERV és a HRV szenzibilis hatásfok értékeinek összehasonlítása alapján nem lehet éves energiafogyasztásra vonatkozó következtetéseket levonni, hiszen az entalpiás ERV hővisszanyerő belsejében a hőátvitel mellett nedveségátvitel is történik a szellőztető berendezésbe érkező külső frisslevegő és a kiszolgált térből elszívott, elhasznált levegőáramok között, így nem lehet figyelmen kívül hagyni az ERV látens, illetve totális hatásfokát az épületenergetikai méréteázések, energetikai tanúsítások készítése során.

Az ERV esetében kapott eredményekből megállapítható az is, hogy a külső levegő relatív páratartalmának növekedésével csökkennek a látens és a totális hatásfok értékei. A maximális látens és totális hatásfok értékek az alacsonyabb külső levegő hőmérsékletek esetén érhetők el. Az eredmények alapján az ERV átlagos látens hatásfokának értéke téli és nyári időszak esetén is 69% volt, az átlagos totális hatásfokának értéke téli időszak esetén 77%, míg nyári időszak esetén 78% volt.

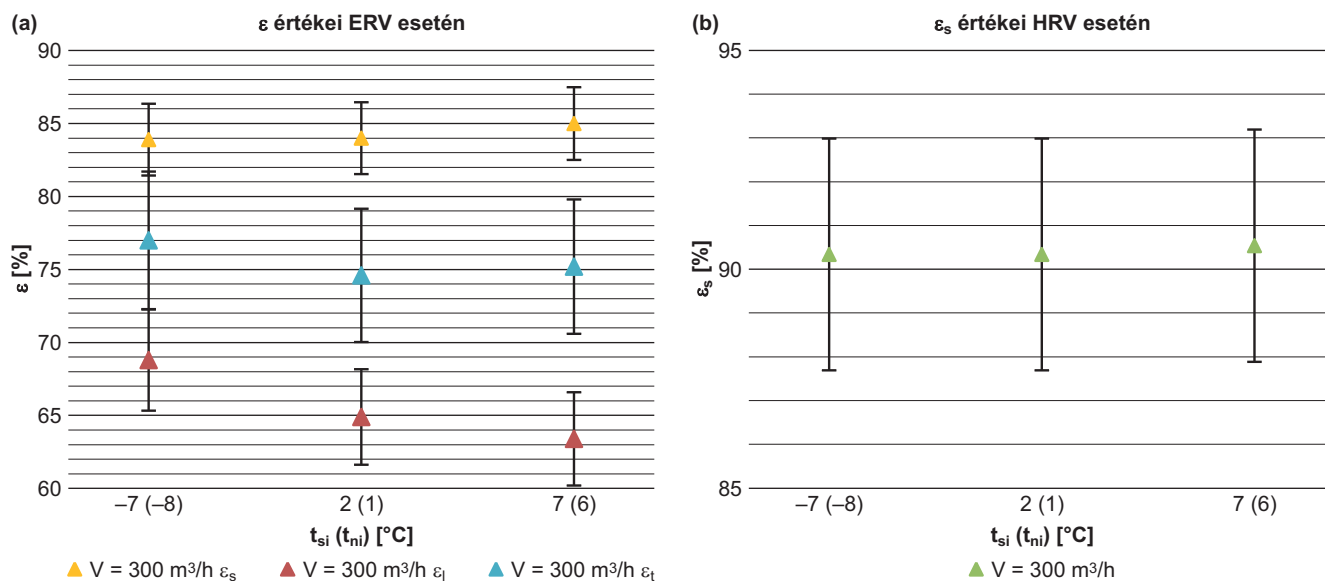
A kísérleti vizsgálatok eredményeiből megállapítható az is, hogy az ERV milyen mértékben képes páráítani a hideg téli levegőt, vagy páramentesíteni a nedves nyári levegőt. Az eredményekből megállapítható, hogy minél szárazabb a külső levegő télen, vagyis minél alacsonyabb a külső levegő abszolút

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{so}} = \frac{-m_{si}}{m_{si} \cdot (h_{si} - h_{ei})}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial h_{ei}} = \frac{(m_{si} \cdot h_{si} - m_{si} \cdot h_{so}) \cdot m_{si}}{[m_{si} \cdot (h_{si} - h_{ei})]^2}, \quad (14)$$

$$\omega_{\varepsilon_T} = \pm 6,12\%.$$





**14. ábra. Hatásfok értékek mérési bizonytalansággal (%) a külső levegő hőmérsékletének ( $^{\circ}\text{C}$ ) függvényében,  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  levegő térfogatáram mellett, (a) az ERV és (b) a HRV esetében**

nedvességtartalma télen, az ERV annál hatékonyabban képes párasítani a berendezésbe érkező hideg, száraz külső friss levegőt. Nyáron pedig a külső levegő abszolút nedvességtartalmának növekedésével a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) mértéke a helyiségekből elszívott, elhasznált levegő oldal és a befűjt, friss levegő oldal között csökken, melynek következtében a kiszolgált térben nagyobb mértékű páramentesítés érhető el. A párasítás mértéke akkor a legnagyobb télen, amikor a legszárazabb a külső levegő állapota.

A kísérletek során kapott eredmények alapján télen a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) maximális értéke  $80,6\%$  volt,  $0,931 \text{ [g/kg]}$  külső levegő abszolút nedvességtartalom esetén. Nyáron pedig minél nedvesebb a külső levegő, vagyis a külső levegő abszolút nedvességtartalmának növekedésével a szellőztetett térben a páramentesítés mértékének növekedése jellemző, hiszen az említett külső levegő állapotváltozásának folyamata során a kiszolgált térbe befűjt friss levegő nedvességtartalma egyre kisebb lesz (a látens hatásfok csökkenése miatt), állandó elszívott, elhasznált levegő állapot feltételezése mellett. Így a szellőző levegő több nedvességterhelést lesz képes felvenni és elszállítani a kiszolgált térből nyáron.

A kísérletek során kapott eredmények alapján a nedvesség visszanyerés (látens hatásfok) mértékének minimuma  $69,6\%$  volt,  $18,914 \text{ [g/kg]}$  nyári külső levegő abszolút nedvességtartalom esetén. Az eredményekből tehát levonható az a következtetés, hogy a szellőztető berendezés ERV-vel történő üzemeltetése kedvezően hat a kiszolgált tér belső levegő minősége szempontjából.

A kísérleti mérések alapján meghatározott szenzibilis, látens és totális hatásfok adatok közül a maximális értékeket egyébként nyári időszakban ( $40^{\circ}\text{C}$  külső léghőmérséklet esetén) történő  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  levegő térfogatáram melletti üzemeltetés esetén mértük, ami HRV esetében  $94,2\%$ , míg az ERV esetében ennek értéke csupán kisebb eltéréssel  $94,1\%$  volt.

A kutatás folytatása gyanánt a cél a vizsgált hővisszanyerők anyagának a szellőztetés energiafogyasztására gyakorolt

hatásának a vizsgálata különböző éghajlatú európai régióban, a kísérletek során eredményül kapott hatásfok értékek felhasználásával.

## Támogatók

Ez a kutatási munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFI Alapból [azonosítószám: NKFIH PD\_18 127907] valósult meg, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatásával készült, Budapest, Magyarország.

Külön köszönetnyilvánítás illeti *Tóth Istvánt* és *Bakó Tamást* a Zehnder Group Deutschland GmbH Magyarországi Kereskedelmi Képviselőjétől, akik a Zehnder ComfoAir Q350 készüléket biztosították a kutatáshoz, és elhivatott szakmai, műszaki háttértámogatásukkal hozzájárultak a kutatómunka sikeréhez.

## Felhasznált irodalom

- Ferrara, M., Monetti, V., Fabrizio, E. Cost-Optimal Analysis for Nearly Zero Energy Buildings Design and Optimization: A Critical Review. *Energies* 2018, 11, 1–32.
- Tsirigoti, D., Tsikaloudaki, K. The effect of climate conditions on the relation between energy efficiency and urban form. *Energies* 2018, 11, 582.
- Wan, K.K.W.; Li, D.H.W.; Liu, D.; Lam, J.C. Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. *Build. Environ.* 2011, 46, 223–234.
- Sailor, D.J.; Pavlova, A.A. Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change. *Energy* 2003, 28, 941–951.
- Lam, J.C.; Tang, H.L.; Li, D.H.W. Seasonal variations in residential and commercial sector electricity consumption in Hong Kong. *Energy* 2008, 33, 513–523.
- Giannakopoulos, C.; Hadjinicolaou, P.; Zerefos, C.; Demosthenous, G. Changing energy requirements in the Mediterranean under changing climatic conditions. *Energies* 2009, 2, 805–815.

7. Karlsson, J.; Roos, A.; Karlsson, B. Building and climate influence on the balance temperature of buildings. *Build. Environ.* 2003, 38, 75–81.
8. Calise, F.; D'Accadia, D.M.; Barletta, C.; Battaglia, V.; Pfeifer, A.; Duic, N. Detailed modelling of the deep decarbonisation scenarios with demand response technologies in the heating and cooling sector: a case study for Italy. *Energies* 2017, 10, 1535.
9. Ahmed, K., Carlier, M., Feldmann, C., Kurnitski, J. A New Method for Contrasting Energy Performance and Near-Zero Energy Building Requirements in Different Climates and Countries. *Energies* 2018, 11, 1334.
10. García, T.A., Mora, D. Energy performance assessment of building systems with computer dynamic simulation and monitoring in a laboratory. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 2011, 143, 449–460.
11. Giuseppe, E., Marco, M., Angelo, Z., Michele, D.C. The use of air handling units in residential near zero-energy buildings. *WIT Transactions on Ecology and The Environment* 2017, 224, 147–158.
12. Ahmed, Y.T.A.-Z., Hong, G. Experimental investigation of counter flow heat exchangers for energy recovery ventilation in cooling mode. *International Journal of Refrigeration* 2018, 93, 132–143.
13. Engarnevis, A., Huizing, R., Green, S., Rogak, S. Heat and mass transfer modeling in enthalpy exchangers using asymmetric composite membranes. *Journal of Membrane Science* 2018, 556, 248–262.
14. Silvia, G.-L. Beatriz, R.-S., José, M.M. Control strategies for Energy Recovery Ventilators in the South of Europe for residential nZEB—Quantitative analysis of the air conditioning demand. *Energy and Buildings* 2017, 146, 271–282.
15. D'Este, A., Gastaldello, A., Schibuola, L., Energy saving in building ventilation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 2005, 81, 335–344.
16. Zhang, L.Z., Zhu, D.S., Deng, X.H. Hua, B. Thermodynamic modeling of a novel air dehumidification system. *Energy and Buildings* 2005, 37/3, 279–286.
17. Mardiana, A.; Riffat, S.B. Review on physical and performance parameters of heat recovery systems for building applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28, 174–190.
18. EN 13141-7:2010, Ventilation for buildings – Performance testing of components / products for residential ventilation – Part 7: Performance testing of components / products of mechanical supply and exhaust ventilation units (including heat recovery) for mechanical ventilation systems intended for single family dwellings, 2010.
19. ASHRAE Standard 84-1991, Method of testing air-to-air heat exchangers, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 1991.
20. Kline, S., McClintock, F. Describing the uncertainties in single sample experiments. *Mechanical Engineering* 1953, 75/1, 3–8.



### Az Épületgépészeti Múzeum kincseiből

#### Betz-féle mikromanométer

Előző cikkeinkben már szóltunk a nyomásmérés szerepének fontosságáról a térfogatáram, illetve a tömegáram meghatározásának szempontjából. A márciusi lapszámban ismerhették meg az „U”-csöves, a ferdecsoves és a görbecsoves manométereket. Most egy különleges, precíziós mikromanométert mutatunk be.



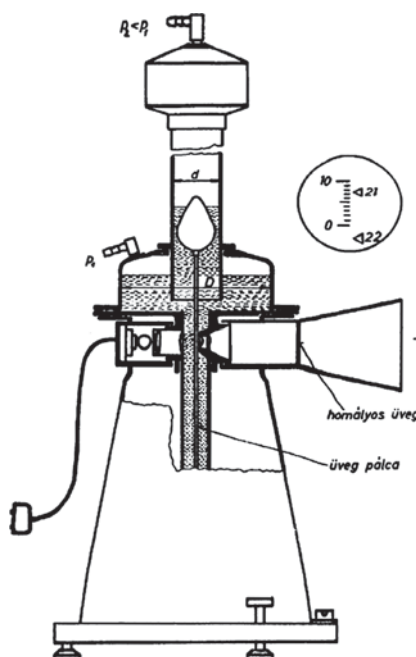
A Betz-féle mikromanométerből 2 darabunk van, amelyeket a BME I. Épületgépészeti Tanszékétől, vagy mai nevén a BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékétől kaptunk.

Albert Betz (1885-1968) 1919-ben fogalmazta meg először ennek a folyadékkal töltött manométernek a gondolatát. A folyadék általában víz vagy alkohol. A műszer lényege, hogy a folyadékszintek elmozdulását, azaz a nyomáskülönbséget egy üvegből készült úszóra függesztett üvegpálcán lévő skála mutatja. A lámpával megvilágított pálcá képe matt üvegekijelzőn látható. Az optikai leolvasás teszi lehetővé a milliméter tizedének leolvasását, és így még a századrészek is becsülhetők.

A műszer elvét szemléletesen mutatja a mellékelt rajz.

Ez a nyomásmérő pontos nullpont beállítást és vízszintezést igényel. A belső kialakítása miatt viszonylag tehetetlen, ezért hosszabb beállási idővel kell számolni. Méréshatára 200 mm v.o. (milliméter vízoszlop), azaz kb. 2000 Pascal.

Ezt a nagypontosságú mikromanométert általában laboratóriumi mérésekhez, illetve az egyszerűbb nyomásmérők, mint például a ferdecsoves és a görbecsoves manométerek hitelesítéséhez használják.



Dr. Chappon Miklós